

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Ústav letecké dopravy



# **Inerciální referenční systém**

## **Inercial Reference System**

Student:  
Vedoucí bakalářské práce:

Adam Pálka  
prof. Ing. Rudolf Volner, CSc.

Ostrava 2011

## Zadání bakalářské práce

Student: **Adam Pálka**  
Studijní program: B3712 Technologie letecké dopravy  
Studijní obor: 3708R036 Technologie letecké dopravy  
Téma: Inerciální referenční systém  
Inercial Reference System

Zásady pro vypracování:

1. Analýza současného stavu a vlastností.
2. Hardware-ové a software-ové řešení.
3. Aplikační možnosti.
4. Prezentační program.

BP musí v rámci úvodu obsahovat kapitolu se stanovením cílů práce a v závěru zhodnocení dosažených cílů.

Seznam doporučené odborné literatury:

Volner, R. a kol. Flight Planning Management. Brno: CERM Brno. 2007. ISBN 978-80-7204-496-2  
Volner, R. Letecká radiotechnika. Praha: ČVUT Praha. 2003. ISBN 80-7204-294-7  
Volner, R. Digitální technologie - elektronické přístrojové systémy. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2007. ISBN 978-80-248-1640-1  
Volner, R. Radionavigace I. Ostrava: VŠB-TU Ostrava. 2008. ISBN 978-80-248-1917-4

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

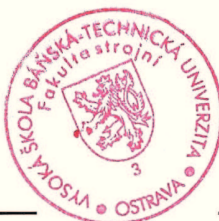
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Rudolf Volner, CSc.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Vladimír Smrž, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

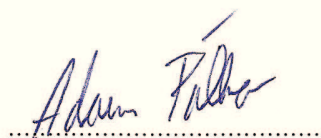
V Ostravě 12. 5. 2011

.....  
*Adam Polák*  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 12. 5. 2011



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Adam Pálka

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Velká Strana 26, Háj ve Slezsku

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

PÁLKA, A. *Inerciální referenční systém: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2011, 36 s. Vedoucí práce: prof. Ing. Rudolf Volner, CSc.

Bakalářská práce se zabývá popisem, rozbořem a analýzou inerciálního referenčního systému (IRS). V úvodu autor popisuje některé současné a možné budoucí problémy letecké dopravy. Konstatuje, že je teoreticky možné je částečně řešit pomocí IRS. Definuje a analyzuje současný stav a vlastnosti IRS. Popisuje hardware-ové a software-ové řešení IRS. Stručně shrnuje historii bezpilotních letounů a aplikaci IRS v jejich regulační soustavě. Diskutuje o možné budoucnosti letecké dopravy, vyvoji a aplikaci IRS.

### **Klíčová slova**

Inerciální referenční systém, setrvačnick, akcelerometr.

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

PÁLKA, A. *Inercial Reference System: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transit, 2011, 36 p. Thesis head: prof. Ing. Rudolf Volner, CSc.

This bachelor thesis deals with description and analysis of the inertial reference system (IRS). In the introduction, the author describes some of the current and possible future problems of the air transport. Theoretically, the problems can be partially solved by the IRS. The author also describes and analyzes the current state and characteristics of the IRS. He also describes the hardware and software solutions of the IRS. The thesis also contains a brief summary of the history of the unmanned aircrafts and the usage of the IRS in their regulatory system. The possible future of the air transport, development and usage of the IRS are also being discussed.

### **Keywords**

Inercial reference system, flywheel, accelerometer.

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především mému otci Ing. Zdeňku Pálkovi, za cenné rady, nápady a pozitivní přístup.

Také chci také poděkovat prof. Ing. Rudolfu Volnerovi, CSc. Za poskytnutí literatury, ochotu a cenné připomínky.

## Obsah:

0	Cíl.....	9
1	Úvod.....	10
2	Analýza současného stavu a vlastností.....	12
2.1	Definice Inerciálního Referenčního Systému.....	12
2.2	Vývoj, současný stav a vlastnosti Inerciálního Referenčního Systému.....	12
3	Hardware-ové, software-ové řešení .....	14
3.1	Fyzikální princip inerciálního referenčního systému [12].....	14
3.2	Chyby inerciálního referenčního systému [3], [12].....	14
3.3	Snímače .....	16
3.4	Snímače- setrvačnický mechanický, základní fyzikální princip .....	16
3.5	Snímače- setrvačnický optický- s vláknovou optikou .....	18
3.6	Snímače- setrvačnický optický- laserový setrvačnický (LRG- Ring Laser Gyro) .....	19
3.7	Dopplerův jev .....	20
3.8	Coriolisův efekt .....	21
3.9	Snímače- akcelerometry, fyzikální princip akcelerometru .....	21
3.10	Snímače- akcelerometry mechanické (mechanický oscilátor).....	22
3.11	Systém indikace letových údajů kurzovotikál .....	23
3.12	EFIS- Electronic Flight Instrument System (elektronický systém zobrazení letových přístrojů).....	25
3.13	Displeje.....	26
3.14	LCD (Liquid crystal display).....	27
3.15	AMLCD (Active Matrix Liquid Crystal Display) .....	27
3.16	HUD (Head Up Display) .....	28
4	Aplikační možnosti inerciálního referenčního systému .....	28
4.1	Bezpilotní letouny- UAV, (Uninhabited Aerial Vehicles).....	28

4.2	Obecná regulační soustava bezpilotních letounu s využitím inerciálního referenčního systému jako záporné zpětné vazby .....	31
4.3	Úvaha o budoucnosti letecké dopravy, možný vývoj a aplikace inerciálního referenčního systému .....	32
5	Zhodnocení cíle.....	35
6	Závěr.....	35
7	Použita literatura .....	36
7.1	Publikace: .....	36
7.2	Periodika: .....	36
7.3	WWW stránky: .....	36
7.4	Vlastní poznámky z výuky a materiály poskytnuté ve vyučovacích hodinách: .....	36



## **0 Cíl**

Cílem této bakalářské práce je popis, rozbor a analýza současného stavu fungování inerciálního referenčního systému a posouzení některých jeho možných aplikací a vývoje v budoucnu.

# 1 Úvod

Inerciální referenční systém je autonomní soustava přístrojů (například: setrvačnicků, akcelerometru a dalších) navzájem pracujících jako celek, porovnávající polohy letadla vzhledem k povrchu země a zeměpisnému severu.

Primární potřeba inerciálního referenčního systému vznikla s potřebou lepší orientace ve vzdušném prostoru. Nicméně s rostoucí automatizací letu, dosáhla tato potřeba vyšší úrovně, vyplývající z potřeby přepravy většího počtu lidí, a rozvoje populace.

Počet lidí na planetě rok od roku roste. Brzy nás bude 7 miliard a úměrně s tím a s industriálním rozvojem společnosti roste i počet lidí přepravených letadly za rok. I přes současné problémy letecké dopravy, letečtí odborníci po celém světě v současnosti uvažují o tom, jak do budoucna uspokojit zvyšující se poptávku po letech a zároveň zajistit rentabilitu letecké dopravy (při dnes už tak malých maržích na letenkách mnohdy jen okolo šesti procent). Ale nejen proto, musíme neustále leteckou dopravu zefektivňovat a stále posouvat dopředu. Zároveň musíme dodržovat nově a nově vytvářené předpisy s často si odporujícími výstupy. Ať už se dotýkají bezpečnosti, regulace vzdušného toku, regulace emisí či snižování hluku. Ať už mají pozitivní nebo negativní vliv, obvykle znamenají snížení propustnosti vzdušného prostoru a kapacity letišť. Letecká a letištní technika se stále zdokonaluje. Ale bude to stačit?

Jednou musíme dojít do bodu, kdy nebude možno zvyšovat počty letadel, kvůli přeplněnosti současných letišť. Už nyní jsou některá letiště doslova obestavěna lidskými příbytky a díky tomu je jejich rozšiřování nemožné. Letové cesty k strategickým hubům jsou přeplněny a musí být regulovány.

I to je jeden z důvodů proč musíme hledat nové myšlenky a nápady. Je třeba přijít s novým řešením, jak přepravit velké množství lidí velkou rychlostí.

Ať už je podnět jakýkoli, první radikální myšlenky zvýšení kapacity letadel při zachování jejich rozměrů podpořil generální ředitel společnosti Ryanair Michael O’Leary. Ten navrhl, aby lidé na palubě letadla cestovali na kratších tratích tzv. „na stojáka“, tak jako třeba v tramvaji. Osobně si myslím, že jeho myšlenka není úplně špatná. A reakce lidí na cestování ve stoje, se různí. Nicméně z hlediska bezpečnosti narážíme na velký problém. Ale i přes to už můžeme na internetu najít řadu náčrtů “sedadel” pro cestování ve stoje

Zvyšování rychlosti letecké dopravy nemusí nutně znamenat jen zvyšování výkonů motoru. Potenciál rychlých letadel nejsme schopni plně využít, pokud propustnost a kapacita

vzdušného prostoru je malá. Pro zvyšování efektivity je důležitá rovnováha. Musíme oboje zvyšovat pokud možno rovnoměrně.

A tady vidím částečné řešení propustnosti a kapacity za současné situace v rozvoji využití a nových aplikací inerciálního referenčního systému. Ten umožňuje automatizaci řízení letadel a jejich přesnější navigaci na úrovni, která překračuje mentální schopnosti člověka. Díky automatizaci, můžeme vytvářet užší letové koridory a umístit jich více vedle a nad sebe.

Nicméně budoucnost letecké dopravy může být i jiná. Jeden z modelů rozvoje společnosti ukazuje na problém, že celý svět se rozdělí na lidi bohaté a masu lidí chudých. [12] Tyto problémy už nyní nastaly v Číně a především v Indii, kde se je nedaří ani mírnit. Je třeba tedy zvážit pro koho a na jaké úrovni má letecká doprava v budoucnu být. Teoreticky je tedy hodně pravděpodobné, že se v budoucnu růst počtu letů zastaví, možná i sníží, nebo překloupí do jiné dimenze.

Mění se také vzdálenost, na kterou je zajímavé létat. Oproti dřívějšímu vzrůstá hustota dálnic, silnic a železnic. A tak jsou lidé schopni překonat kratší vzdálenosti rychleji autem nebo vlakem než letadlem. Protože zatímco u letadla musíte být na letišti nějakou dobu před odletem, autem už jste za tu dobu třeba v práci. A nejen proto se letecká doprava stává na kratších vzdálenostech neschopná konkurence.

V budoucnu by mohla mít letecká doprava velkou konkurenci i na středně dlouhých a dlouhých tratích. Protože například Čína plánuje propojení své země s Evropou pomocí vlaku Maglev a ty jsou po světě známé především svou rychlostí. A podobných projektů se objevuje víc a víc.

Letecká doprava by se možná měla začít orientovat na ještě delší vzdálenosti než doposud. Třeba až na lety do vesmíru. Už nyní existuje řada projektů soukromých firem na komerční lety do vesmíru a vesmírné hotely. Zároveň by se měla začít více orientovat na bezpilotní letouny a postupně vypracovat zcela nový modernější systém řízení letového provozu a letišť.

Tomuto může výrazně přispět rozvoj inerciálních referenčních systému spojených s automatizací.

Letecká doprava se musí od základu změnit. Měla by se více přiblížit lidem. Měla by se stát rychle se přizpůsobující dynamickou dopravou, která za sebou nebude pořád táhnout masu úředníků jako do teď.

## 2 Analýza současného stavu a vlastností

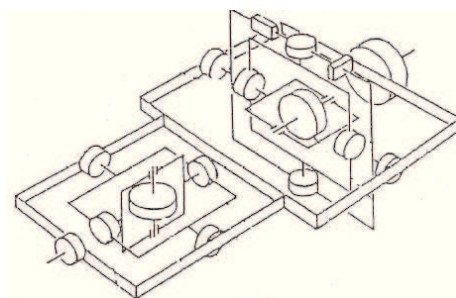
### 2.1 Definice Inerciálního Referenčního Systému

Inerciální referenční systém je zcela autonomní soubor mechanických později pak zejména optoelektronických komponentů, navzájem spolupracujících jako celek. Jejich výstupem jsou přesné informace o kurzu letu a o podélném a příčném náklonu letadla, vzhledem k vektoru gravitačního zrychlení země a souřadné soustavy země.

### 2.2 Vývoj, současný stav a vlastnosti Inerciálního Referenčního Systému

Jednotlivé komponenty přerostly v inerciální referenční systém v Boeingu 757 a 767 v letech 1980 a jde o nejstarší z inerciálních systémů.

Prvními inerciálními systémy byly kurzovetikály. Nicméně známé jsou spíše pod mezinárodním názvem AHRS, neboli Attitude Heading Reference System. Název kurzovetikály byl zavedený v československé armádě. Kurzovetikály v sobě spojují funkce gyrovetikály a gyrohorizontály umístěné na společné základně. Oba dva setrvačníky jsou umístěné v kardanově závěsu s třemi stupni volnosti. Celá základna je potom otočně umístěná v ložiscích a namontována do letadla co nejblíže těžiště tak, aby osa otáčení základny byla rovnoběžná se směrem podélné osy a kolmá na příčnou osu letadla. Tvoří tak stabilizovanou základnu vůči souřadné soustavě země. Kurzovetikály dále obsahují korekční motorky pro nastavení správné polohy setrvačníku před letem a dva akcelerometry, které během letu měří velikost zrychlení v podélné a příčné ose letadla a vysílají signály pro korekci gyrohorizontály za letu.



Obr. 2.2.1 Kurzovetikála [6]

Problémem kurzovetikály je její složitost. Díky tomu, že je složena z mnoha pohyblivých součástí. Je tu relativně velká pravděpodobnost poruchy. Její další nevýhodou je velikost, větší hmotnost, a v neposlední řadě i velká cena, kterou zvyšují požadavky na preciznost výroby.

S vývojem elektroniky a optoelektroniky byly vynalezeny optické setrvačníky. Ty neobsahují žádné pohyblivé prvky. Zároveň stabilizovanou základnu nahradila základna pevná. Ta je namontována do letadla co nejbližší k těžišti na pevně a na ní jsou namontovány tři setrvačníky měřící úhlové rychlosti v souřadné soustavě letadla. Čili v příčné, podélné a vertikální ose letadla. Přibyl také číslicový počítač inerciálního referenčního systému. Ten počítá a vyhodnocuje výsledné hodnoty polohy snímačů vůči souřadnému systému letadla a přepočítává je do souřadné soustavy země. Pevná základna dále obsahuje tři akcelerometry. Ty měří zrychlení v podélné, příčné a vertikální ose letadla a slouží pro korekce výpočtů počítače. Díky absenci pohyblivých prvků se snížila pravděpodobnost poruchy a cena.

Inerciální referenční systém je zcela autonomní, nicméně s dalším vývojem se jeho výstupní signály začali využívat v mnoha dalších systémech. Například přivedením jeho signálu do air data computer vzniká systém ADIRS (Air Data/ Inertial Reference Unit), který pak navíc poskytuje informace o rychlosti větru, aktuální pozici letadla, průmětu trasy letu na zem a snosu.

Z inerciálního referenčního systému se postupně vyvinul inerciální navigační systém kalibrovaný pomocí pozemních radionavigačních zařízení nebo GPS. Hardware těchto systémů je naprosto stejný. Rozdíl je pouze v software, kdy počítač inerciálního navigačního systému provádí o jednu integraci navíc. Čímž zjistí dráhu uraženou letadlem za čas. Skládáním jednotlivých vektorů drah je schopen zjistit aktuální pozici letadla od počátečního bodu letu.

### 3 Hardware-ové, software-ové řešení

#### 3.1 Fyzikální princip inerciálního referenčního systému [8]

Systém je založený na třech Newtonových zákonech klasické mechaniky:

1. Každé těleso setrvává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu, pokud není donuceno působením vnější síly svůj pohybový stav změnit.
2. Výslednice sil působících na těleso je rovna součinu jeho hmotnosti a zrychlení:

$$\vec{F} = m * \vec{a} \quad (3.1.0)$$

3. Zákon akce a reakce: Každá síla  $\vec{F}_A$ , kterou jedno těleso působí na druhé, vyvolává reakci- sílu  $\vec{F}_B$ , opačného směru, kterou druhé těleso působí na to první.

Síly  $\vec{F}_A$  a  $\vec{F}_B$ , kterými na sebe působí dvě tělesa, jsou stejně velké, opačného směru, současně vznikají a zanikají. Tyto síly se nazývají **akce** a **reakce**.

Z rovnice (3.1.0) je vidět, že zjištěním působící síly, lze snadno zjistit okamžité zrychlení, které toto silové působení způsobilo. Z vektoru zrychlení snadno vypočteme rychlost, podle:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (3.1.1)$$

A integrací (3.1.1) podle času dostaneme:

$$\vec{v} = \int_{t_0}^{t_1} \vec{a} dt \quad (3.1.2)$$

Když známe vektor pohybu, můžeme využít vztahu:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt} \quad (3.1.3)$$

Integrací (3.1.3) podle času získáme uraženou dráhu:

$$\vec{s} = \int_{t_0}^{t_1} \vec{v} \quad (3.1.4)$$

Postupnou integrací tedy počítač inerciálního referenčního systému získává vektory zrychlení, rychlosti a uraženou dráhu. Tyto vektory lze rozložit na dílčí složky a umístit je do příslušného referenčního prostoru. Tím nemusí být vždy souřadnicový systém země.

#### 3.2 Chyby inerciálního referenčního systému [3], [13]

Měření polohy a směru funguje na vcelku jednoduchém principu, ale jeho realizace v praxi je poměrně složitá. Už v měření zrychlení se mohou vyskytovat chyby, které jsou dále integrovány a kumulují se. Z toho plyne, že inerciální referenční systém není nekonečně přesný a proto je nutné v časových intervalech provádět kalibraci.

V dnešní době se ke kalibraci asi nejvíce využívá systém GPS, popřípadě některé z pozemních radionavigačních zařízení. Například VOR nebo DME/DME.

Chyby inerciálních systémů lze řadit do čtyř základních skupin:

- Chyby určené, kdy tyto chyby se vyskytují s určitou pravidelností a proto je dokážeme matematicky eliminovat.
- Druhou skupinou jsou chyby náhodné. Tyto chyby se vyskytují pouze náhodně bez pravidelností. Pro jejich korekci můžeme použít pouze matematickou aproximaci. Tím se, ale pouze přiblížíme skutečným hodnotám.
- Další skupinou chyb nazýváme chyby ohraničené. Jedná se o chyby nenarůstající s časem. Zpravidla jsou způsobeny nepřesnostmi snímačů a při integrování dojde k jejich dalšímu zvětšení.
- Existují i chyby neohraničené. Tyto chyby mají daleko větší dopad, protože se s časem neustále kumulují. Příčinou těchto chyb bývá počáteční chybné nastavení gyroskopů.

Jako zdroje chyb se dají uvést:

- vychýlení, kolísání a jiné chyby na akcelerometrech či gyroskopech
- chyby v určení výchozí polohy, zrychlení nebo postavení snímače
- vychýlení senzoru z umístění na základně
- aproximace v mechanismu systémového modelu

### 3.3 Snímače

Snímače jsou zařízení určené pro měření fyzikálních veličin, kdy jejich výstup je vždy funkcí vstupu. Můžou být různých složitostí. Můžou být složeny jen z jedné součásti, ale mohou být i soustavou velkého počtu součástí.

Dnes je však trendem, vše co nejvíce zjednodušovat a integrovat do sebe. Je to logické, protože čím méně součástí máme, tím menší je pravděpodobnost poruchy. Proto snímače většinou fungují na důmyslném využití základních fyzikálních zákonů.

### 3.4 Snímače- setrvačnický mechanický, základní fyzikální princip

Mechanický setrvačnický je tuhé, souměrné, homogenní těleso, které se otáčí velkou rychlostí okolo své osy souměrnosti. Pro nás nejdůležitější jeho vlastností je, že roztočený mechanický setrvačnický nemění svou polohu. Pokud k této změně není donucen vnější silou. To znamená, že jestliže dokážeme umístit tento setrvačnický v letadle do takového závěsu, který mu bude umožňovat volnost pohybu, vůči měnící se poloze letadla, a budeme tento úhel schopni měřit. Jsme schopni určit polohu letadla vůči referenční soustavě.

Přesné chování a vlastnosti setrvačnického popisuje 1. a 2. zákon gyroskopu: [13]

1. Zákon gyroskopu: Gyroskop zachovává svoji polohu v inerciálním prostoru, pokud není nucen působením vnějších sil tuto polohu měnit.

Když na rotující gyroskop působí vnější síly rušivým momentem, vzniká gyroskopický efekt, který se projevuje precesním pohybem- precesí. Tento pohyb popisuje 2. Zákon gyroskopu.

2. Zákon gyroskopu: Precesní pohyb probíhá tak, aby vektor momentu hybnosti gyroskopu  $H$  splýnul kratší cestou s vektorem momentu  $M$  rušivé síly.

Vektor momentu hybnosti je součin vektoru setrvačnosti  $J$  a úhlové rychlosti otáčení  $\Omega$ . Vektor momentu hybnosti určíme pravidlem pravé ruky: Když prsty pravé ruky ukazují smysl otáčení setrvačnického, palec ukáže směr vektoru hybnosti.

Úhlová rychlost precesního pohybu-  $\omega_p$  je přímo úměrná rušivému momentu  $M$  a nepřímo úměrná momentu hybnosti gyroskopu  $H$ .

$$\omega_p = \frac{M}{H} \quad (3.4.0)$$

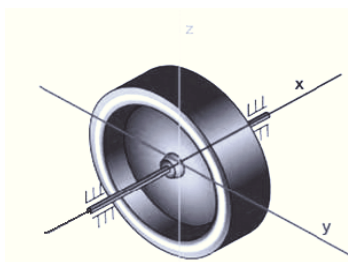
Rušivé momenty vytváří nejčastěji nevyváženost gyroskopu, nebo tření vznikající u rotujícího gyroskopu v ložiscích, či tření o plyn, kterým je přístroj vyplněn.



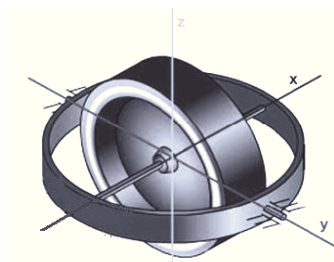
Aby gyroskop mohl vykonávat správně svoji funkci, musí být uložen v závěsu- rámu. Tyto rámy umožňují, aby při jakémkoliv naklácení, si setrvačník mohl zachovat svoji polohu v prostoru.

Závěsy dělíme podle stupně volnosti:

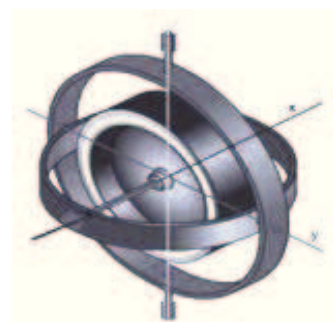
- Gyroskop s jedním stupněm volnosti je uložen v ložiscích tak, aby se mohl otáčet kolem své osy X
- Gyroskop s dvěma stupni volnosti je uložen tak, aby se mohl otáčet kolem své osy X, ale navíc obsahuje rám, který mu umožňuje jeho otáčení i kolem osy Y.
- Gyroskop s třemi stupni volnosti je uložen tak, aby se mohl otáčet kolem své osy X, ale navíc obsahuje dva otočně spojené rámy. Ty mu umožňují otáčet se kolem osy Y i Z. Takovému to uložení říkáme: Kardanův závěs. Tyto rámy umožňují, aby při jakémkoliv naklácení plošiny si setrvačník zachoval svoji polohu v prostoru.



*Obr. 3.4.1 Gyroskop  
s jedním stupněm volnosti [3]*



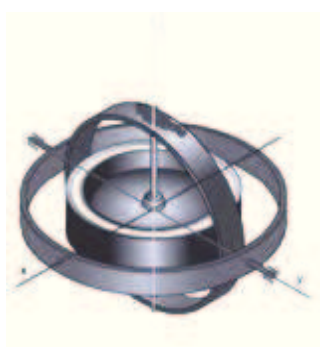
*Obr. 3.4.2 Gyroskop  
s dvěma stupni volnosti [3]*



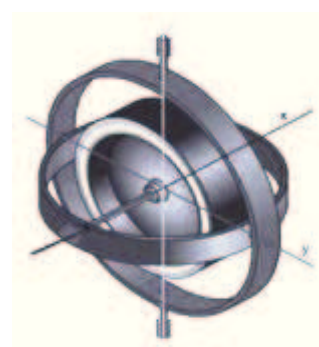
*Obr. 3.4.3 Gyroskop  
s třemi stupni volnosti [3]*

Dále setrvačníky dělíme podle jejich osy souměrnosti na:

- Gyrovertikálu- kdy orientace osy souměrnosti je ve směru geografické vertikály (směrem do středu Země).
- Gyrohorizontálu- kdy orientace osy souměrnosti je kolmá na geografickou vertikálu.

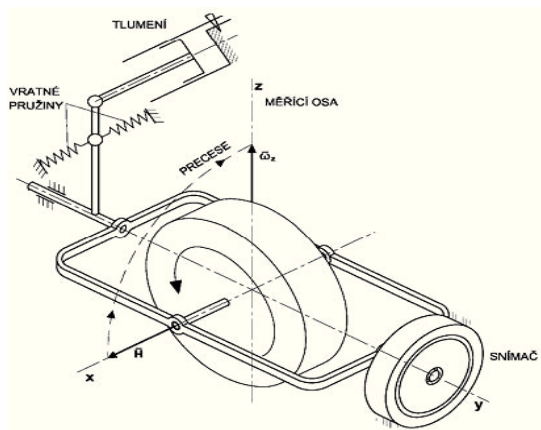


*Obr. 3.4.4 Gyrovertikála [3]*

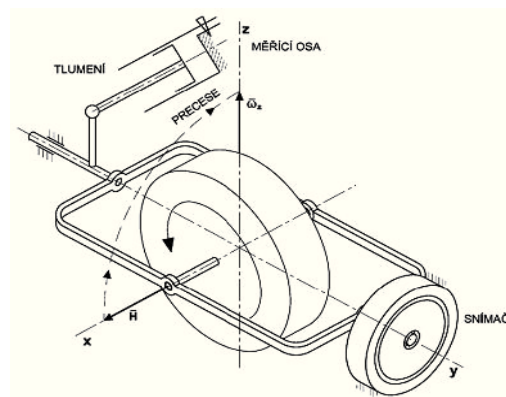


*Obr. 3.4.5 Gyrohorizontála [3]*

Posledním dělením setrvačníků je na derivační a integrační. Derivační gyroskopy mají dva stupně volnosti a obsahují vratnou pružinu a používáme je na měření úhlových rychlostí, ale v inerciálních referenčních systémech se nepoužívají. Integrační gyroskopy mají dva stupně volnosti a vratnou pružinu nemají. A využíváme je na měření úhlů.



Obr. 3.4.6 Derivační setrvačnick [3]



Obr. 3.4.7 Integrační setrvačnick [3]

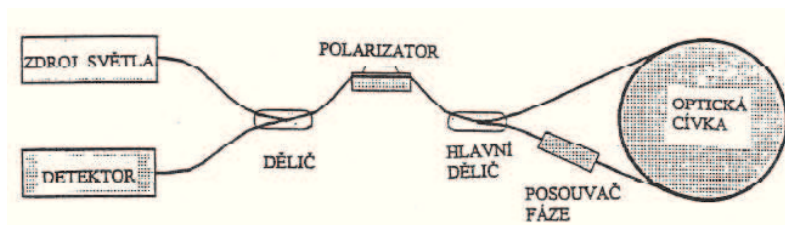
Jako snímače se u kurzovetikál používaly hlavně integrační, setrvačnický s třemi stupni volnosti.

### 3.5 Snímače- setrvačnický optické- s vláknovou optikou

Novodobé inerciální referenční systémy, už ale využívají optické setrvačnický. Nejsou to setrvačnický v pravém slova smyslu. Pracují na principu Dopplerova jevu. Ten vychází ze speciální teorie relativity. Kdy v neinerciálních rotujících soustavách způsobuje rozdílnou rychlost šíření signálu (světelného záření), obíhajícího po uzavřené dráze v opačném směru.

Hlavní součástí gyroskopu s vláknovou optikou, je cívka z optického vlákna. Její délka a počet závitů ovlivňuje přesnost snímače (mívají okolo osmdesáti závitů). Je volena s ohledem na požadavky přesnosti. Zdroj záření- fotonu nám zprostředkovává luminiscenční dioda. Ta je umístěná před optickým děličem, který rozděluje fotony do dvou proudů a posílá je do opačných konců cívky. Fotony projdou cívkou a jsou směřovány do detektoru. Pokud se snímač neotáčí kolem své měřicí osy. Dorazí fotony do detektoru současně a interferují- tedy se maximálně zesílí. Pokud se snímač otáčí kolem své měřicí osy, paprsky se nesetkají v detektoru ve stejném čase, neinterferují- jejich intenzita bude menší. Díky změně výsledné intenzity fotonů, poznáme pohyb okolo měřicí osy snímače. Takže výstupní intenzita je funkcí úhlové rychlosti otáčení.

Ale potřebujeme znát i směr otáčení okolo měřící osy. K tomu nám slouží posouvač fáze. Ten zajišťuje fázový posun v proudech fotonů i v klidovém stavu. Díky němu potom intenzita v jednom směru otáčení roste a v druhém klesá.



Obr. 3.5.1 Optický setrvačnick- s vláknovou optikou [6]

### 3.6 Snímače- setrvačníky optické- laserový setrvačnick (LRG- Ring Laser Gyro)

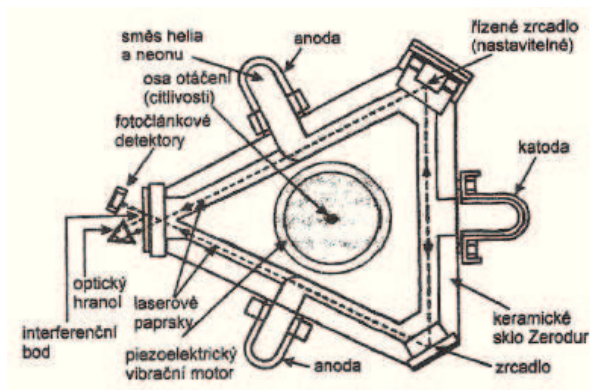
Pracuje také na principu Dopplerova jevu. Laserový rezonanční setrvačnick má podobnou konstrukci jako setrvačnick s vláknovou optikou, ale místo vlákna je zde dráha tvořena třemi zrcadly. Ty jsou umístěné v rozích trojúhelníkového bloku, který je zároveň tělem snímače. Na zrcadla pouštíme proti sobě dva laserové paprsky. Procházejí malými tunely vyhloubenými v obvodu trojúhelníkového bloku s odrazovými zrcadly v rozích. Blok je z keramického skla a kanálky jsou vyplněny směsí helia a neonu. Zdrojem laserového paprsku je zde výboj vysokého napětí (okolo 1500V), který vznikne mezi anodou a katodou. Takto vyrobený zdroj světla je spojitý a má různou frekvenci vlnění. Nežádoucí frekvence vlnění jsou pohlcovány ve speciálním potahu zrcadel.

Pokud je přístroj v klidu- neotáčí se, pak paprsky v kanálcích rotují proti sobě stejnou rychlostí- rychlostí světla. Do detektoru vstupují ve stejném čase, interferují a rotují se stejnou frekvencí. Jestliže začneme přístrojem otáčet v jednom směru. Dráha jednoho paprsku bude delší. Rychlost světla je konstantní, proto se tento rozdíl drah projeví jako posun fázový posun v detektoru interference.

Pro správnou funkci laserového setrvačnicku je důležité, aby délka dráhy paprsku byla celočíselným násobkem jeho vlnové délky. Tato úprava se provádí úpravou délky dráhy- pomocí jednoho nastavitelného zrcadla. To je umístěno na podložce z piezoelektrického krystalu. Délka dráhy se pak upravuje napětím na krystalu.

Další ze zrcadel je polopropustné, za ním je umístěný optický hranol. Jeho funkcí je směřovat paprsky do detektoru- tvořeného fotodiodami, který snímá fázový posun mezi paprsky.

Při velmi malých rychlostech otáčení dochází k „uzamčení“ setrvačníku a ten není schopen rozeznat změnu frekvence paprsků. Proto konstrukce setrvačnicků obsahuje malý vibrační motorek, který tento efekt odstraňuje.



Obr. 3.6.1 Optický setrvačník- laserový [3]

### 3.7 Dopplerův jev

Dopplerův jev nastává při relativním pohybu zdroje zvuku a pozorovatele, který zvuk přicházející od zdroje vnímá. Pozorovatel slyší zvuk jiné frekvence, než je frekvence zdroje, a to vyšší, jestliže se zdroj zvuku a přijímač zvuku přibližují, a nižší, jestliže se zdroj zvuku a přijímač zvuku navzájem vzdalují. Tento jev pozoroval (i když ne zcela objasnil) v roce 1843 rakouský fyzik Christian Andreas Doppler.

Tento jev platí i pro světelné záření. Platí tedy, že pokud se zdroj záření pohybuje od detektoru tohoto záření, pohybují se spektrální čáry směrem k červenému konci světelného spektra– „červený posuv“ a pokud nastane opačná situace, dochází k tzv. „modrému posuvu“– spektrální čáry se pohybují směrem k modrému konci světelného spektra.

Pokud je tedy laserový setrvačník v klidu, jsou frekvence protiběžných paprsků stejné. V případě otočení gyroskopu v jeho rovině citlivosti se frekvence paprsku běžícího ve směru otáčení gyroskopu zmenší o Dopplerův kmitočet úměrný rychlosti otáčení a naopak, frekvence protiběžného paprsku se zvětší. Frekvenční rozdíl obou paprsků je úměrný úhlové rychlosti otáčení gyroskopu. Tento rozdíl je zaznamenán fotoelektrickým detektorem a jeho výstup je zpracován počítačem.

### 3.8 Coriolisův efekt

Coriolisův efekt- je jev, kdy síla vyvolaná působením zemské rotace. Na severní polokouli strhává pohybující se tělesa doprava, na polokouli jižní doleva.

Coriolisova síla je sice relativně malá, ale pro nás důležitá protože, negativně ovlivňuje přesnost setrvačníků, akcelerometru, na kterou klademe velké nároky. Proto počítač inerciálního referenčního systému při výpočtu polohy provádí o tuto sílu opravy.

Coriolisova síla působí na tělesa o hmotnosti  $m$  (kg), která se pohybují rychlostí  $v$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ), uvnitř neinerciální vztažné soustavy rotující úhlovou rychlostí  $\omega$  ( $\text{rad.s}^{-1}$ ).

Vztah pro výpočet vektoru Coriolisovy síly je:

$$F_c = -2m(v * \omega) \quad (3.8.0)$$

Velikost Coriolisovy síly potom spočteme jako:

$$F_c = -2m\omega v \sin \varphi \quad (3.8.1)$$

kde  $\varphi$  je úhel sevřený mezi vektorem úhlové rychlosti a vektorem rychlosti. V případě pohybu po Zemi se tedy jedná o zeměpisnou šířku.

Coriolisova síla je kolmá na směr pohybu tělesa a na osu otáčení. Pro její směr platí:

- Je-li vektor rychlosti rovnoběžný s osou otáčení, Coriolisova síla je nulová.
- Směřuje-li vektor rychlosti kolmo k ose otáčení, Coriolisova síla působí ve směru rotace.
- Směřuje-li vektor rychlosti kolmo od osy otáčení, Coriolisova síla působí proti směru rotace.
- Směřuje-li vektor rychlosti po směru otáčení, Coriolisova síla působí směrem od osy.
- Směřuje-li vektor rychlosti proti směru otáčení, Coriolisova síla působí směrem k ose.

Pohybuje-li se těleso na severní polokouli na východ, má Coriolisova síla směr síly odstředivé – těleso tedy ztrácí část své tíhy. Naopak při pohybu z východu na západ, má Coriolisova síla směr síly dostředivé, a tudíž těleso část tíhy „získává navíc“. Coriolisova síla je na rovníku nulová.

### 3.9 Snímače- akcelerometry, fyzikální princip akcelerometru

Pomocí akcelerometrů je snímáno zrychlení. V inerciálních referenčních systémech klademe velké požadavky na jejich přesnost a rozsah. Přesnosti musí být větší než  $10^{-5}g$ . A

akcelerometry s pevnou instalací musí ve směru podélné a příčné osy splňovat rozsah  $\pm 4g$ . Ve svislé musí být rozsah  $\pm 10g$ .

Akcelerometry jsou založeny na třech Newtonových pohybových zákonech, kdy:

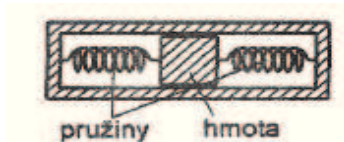
1. Každé těleso setrvává v klidu nebo v rovnoměrném přímočarém pohybu, pokud není donuceno působením vnější síly svůj pohybový stav změnit.
2. Výslednice sil působících na těleso je rovna součinu jeho hmotnosti a zrychlení:

$$\vec{F} = m * \vec{a} \quad (3.9.0)$$

3. Zákon akce a reakce: Každá síla  $\vec{F}_A$ , kterou jedno těleso působí na druhé, vyvolává reakci- sílu  $\vec{F}_B$ , opačného směru, kterou druhé těleso působí na to první.

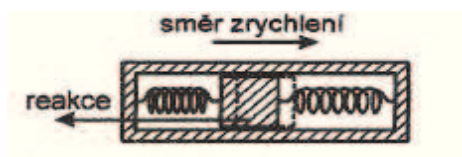
Síly  $\vec{F}_A$  a  $\vec{F}_B$ , kterými na sebe působí dvě tělesa, jsou stejně velké, opačného směru, současně vznikají a zanikají. Tyto síly se nazývají **akce** a **reakce**.

Pro vysvětlení funkce akcelerometru si představme pouzdro, uvnitř kterého se může v jedné ose volně pohybovat závaží. To je udržováno ve střední poloze pomocí dvou pružin. Tak jak je ukázáno na obrázku pod textem.



Obr. 3.9.1 Akcelerometr [3]

Akci- vyvolanou sílu  $\vec{F}_A$  nám představuje vektor zrychlení způsobený zrychlením letadla. Reakci- sílu  $\vec{F}_B$  nám představuje vektor reakce. Úkolem akcelerometru je změřit velikost této síly  $\vec{F}_B$ - reakce.



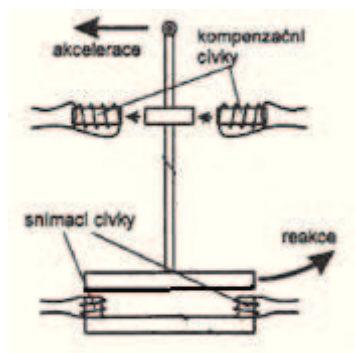
Obr. 3.9.2 Akcelerometr [3]

### 3.10 Snímače- akcelerometry mechanické (mechanický oscilátor)

Jako jedny z prvních byly v inerciálním referenčním systému používány kompenzační mechanické akcelerometry plovákového typu. Jejich pouzdro přístroje je vodotěsné a obsahuje plovák, který je nestejnoměrně zatížený. Úkolem kapaliny je snižovat tření

v ložiscích a tlumit vibrace. Nevýhodou je nutnost kapalinu udržovat na provozní teplotě. Při zrychlení v ose citlivosti dojde díky nestejně rozloženému závaží k pootočení plováku kolem jeho osy. Na ose je připevněn snímač. Ten výchylku změří a jeho signál je výstupem z akcelerometru a zároveň může ovládat servomechanismus vytvářející direkční- vratný moment vracející plovák do původní polohy, nebo je tento moment vytvářen pomocí torzních tyčinek.

V dnešní době využíváme především kompenzační akcelerometry mechanické suché. V zásadě se jedná o kyvadélko. To se v důsledku zrychlení letadla v ose citlivosti akcelerometru vychyluje z nulové polohy ve směru reakce. Tato výchylka je zaznamenána indukčním snímačem. Jeho signál je funkcí výchylky kyvadélka. Tento signál je zesílen a elektrický proud úměrný signálu je veden do kompenzačních cívek, které vrátí kyvadlo (permanentní magnet) do nulové polohy. Velikost proudu vystupujícího ze zesilovače je funkcí výchylky akcelerometru a tedy velikosti reakce. A výstupem akcelerometru. Takovýto akcelerometr bývá označován také jako akcelerometr se zpětnou vazbou. Suché akcelerometry dosahují přesnosti  $10^{-6}$  a jejich rozsah je 10g. Tento rozsah pro současné potřeby inerciálních referenčních systému plně dostačuje.



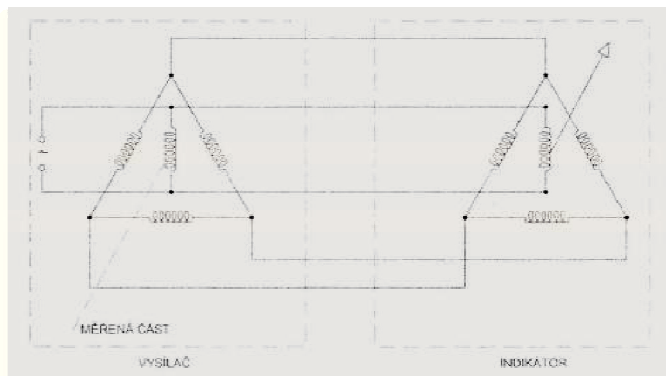
*Obr. 3.10.1 Kompenzační akcelerometr- suchý [3]*

### 3.11 Systém indikace letových údajů kurzovetikál

Poskytuje pilotům navigační informace a informace o polohových úhlech letounu snímaných z kurzovetikály zobrazením na mechanických indikátorech. I přesto, že kurzovetikála a indikátory jsou mechanické, přenos signálu je elektrický- dálkový. Ten má oproti mechanickému řadu výhod. Například nedochází k chybám díky mechanickému tření a je jednodušší vést drakem letadla kabely, než mechanické táhla.



Základním prvkem přenosu signálu od kurzovertikály k indikátoru je selsyn. Jedná se o součástku, která je svou konstrukcí podobná elektromotoru. Obsahuje stator s tři-fázovým vinutím a rotor s jednoduchým vinutím a střídavým napájením. Je navržen tak, že funguje jako snímač/vysílač a přijímač/indikátor a je schopen přenášet úhlové výchylky v rozsahu 0-360°.



*Obr. 3.11.1 Přenos signálu pomocí selsynu [3]*

Celý přenos je složen ze selsynu vysílače a selsynu indikátoru. Kdy rotor selsynu vysílače přesně kopíruje pohyb selsynu indikátoru a ovládá indikační část. Rotor selsynu vysílače, je ovládán měřenou částí. V našem případě máme selsyny vysílače tři. První měřenou částí je příčná osa kardanova závěsu gyrovertikály druhá je její podélná osa a třetí je vertikální osa kardanova závěsu gyrohorizontály. Počtu selsynu vysílačů vždy odpovídá počet selsynu přijímačů.

Když systém zapneme. Přivedeme tím střídavé elektrické napětí do cívek rotoru. To způsobí, že se v cívkách statoru bude indukovat napětí. Jeho velikost je závislá na poloze rotoru. Jestliže jsou cívky rotoru vysílače a přijímače v různých polohách, indukuje se v cívkách statoru různé napětí. Cívkami tedy protéká proud, který vytváří magnetické pole, které působí na rotor. Ale stejnoohlé cívky selsynu statoru vysílače a přijímače jsou spojeny. Z toho důvodu bude napětí mít tendenci se vyrovnat. Proud mezi cívkami proteče a zanikne, jakmile se napětí mezi cívkami vyrovná. Takový stav nastane, když rotor selsynu vysílače a přijímače bude ve stejné poloze. Protože selsyny vysílače, jsou fixovány k osám setrvačnicků, bude se vždy srovnávat rotor selsynu indikátoru a zároveň bude pohybovat s ním spojenou indikační částí.

Indikační část napojená na gyrohorizontálu bude mít podobu kompasové růžice určující kurz letu letadla. Gyrohorizontála nám v podstatě nahrazuje magnetický kompas neovlivněný deviací.

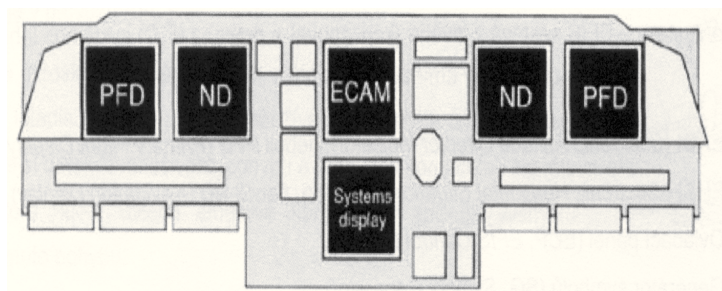


Indikační část napojená na gyrovertikálu má podobu umělého horizontu.

### 3.12 EFIS- Electronic Flight Instrument System (elektronický systém zobrazení letových přístrojů)

Systém EFIS poskytuje pilotům navigační informace a informace o polohových úhlech letounu. Systém převzal funkci zobrazení letových údajů klasických mechanických indikátorů a odsunul je do pozice záložních (tzv. stand-by) přístrojů. U nově vyráběných obchodních a vojenských letadel se prosadil tzv. glass kokpit (skleněný kokpit), kde už mechanické indikátory zastavovány nejsou vůbec.

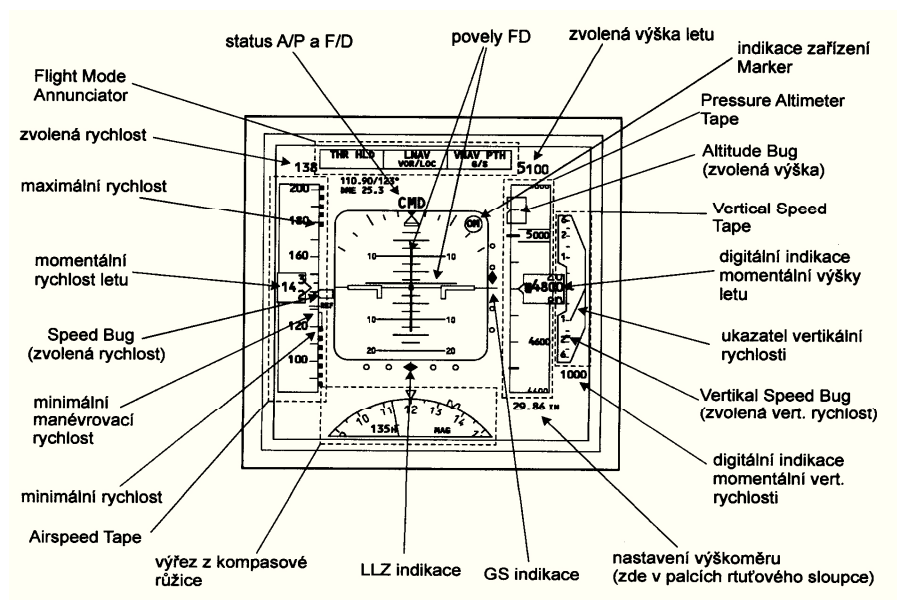
Systém EFIS poskytuje informace pomocí dvou LCD displejů a to intuitivní formou jednoduchou k pochopení, tak aby se minimalizovala pravděpodobnost špatného vyložení informace. Celý systém EFIS se skládá z levého kapitánova a pravého kopilotova systému, který je na obrázku pod textem.



Obr. 3.12.1 Složení systému EFIS [3]

Součástí systému EFIS jsou dva páry displejů:

- EADI (Electronic Attitude Director Indicator) nebo taky PFD (Primary Flight Display). Zastupuje funkci umělého horizontu. Zobrazuje příčný a podélný náklon letadla. Displej dále zobrazuje například: Břevna Flight Directoru, odchylky od local laseru a glide passu, traťovou rychlost, radiovou výšku, výšku rozhodnutí, indikaci zapojení módu autopilota a flight directoru a další informace.



Obr. 3.12.2 Indikátor EADI [3]

- EHSI (Electronic Horizontal Situation Indicator) nebo taky ND (Navigation Display). Podává informace o horizontální situaci letu. Zobrazuje navigační polohu letadla v mapovém zobrazení.



Obr. 3.12.3 Indikátor EHSI- příklad jeho zobrazení [3]

### 3.13 Displeje

Mechanické a elektromechanické indikátory poskytují pilotovi informace o okamžité situaci. Ale nedokážou zobrazovat informace v grafické podobě, text a doporučení k řešení okamžité letové situace. Díky rozvoji elektroniky a výpočetní techniky byly vyvinuty grafické displeje, které tyto informace a mnoho dalších poskytovat dovedou. Zároveň neobsahují žádné mechanické prvky, takže jejich pravděpodobnost poruchy je malá. Jako první se v letectví využívali displeje CRT- Cathode Ray Tube (displeje se žhavenou elektrodou), ale jejich technologie je už překonána a v současnosti používáme hlavně displeje LCD- Liquid Crystal Display (displej využívající kapalných krystalů), AMLCD- Active Matrix Liquid Crystal Display (aktivní maticový displej využívající kapalných krystalů), HUD- Head Up Display (průhledový displej).

### 3.14 LCD (Liquid crystal display)

Neboli displeje využívající tekuté krystaly. Tyto displeje jsou složeny z dvou skleněných destiček, které mají na vnitřní straně průhledné elektrody. Prostor mezi destičkami je vyplněn kapalně krystalickou substancí. Krystalická substance je organická sloučenina tvořená dlouhými tyčinkovitými molekulami. Ty mají schopnost při vzniku napětí vytvářet uspořádanou strukturu podobnou krystalické, která se vyznačuje tím, že omezuje průchod světla. Dále LCD displej obsahuje zdroj světla.

Existují tři typy kapalných krystalů- cholesterické, nematické a hektické. Dělí se podle struktury, kterou vytvářejí.

Pro displeje se nejčastěji využívají krystaly nematické. Ty vytvářejí vrstvou strukturu paralelně orientovaných molekul. Každá vrstva molekul přejímá orientaci krystalů atomů vrstvy sousední nebo povrchu, kterého se dotýká. Proto díky leštění povrchu skleněných destiček můžeme vytvořit libovolnou orientaci sousední vrstvy. Molekuly sousední vrstvy povrchu destičky mají vzájemně kolmou orientaci a při přechodu od jedné destičky k druhé plynule mění směr. V této konfiguraci propouští světlo. Při přivedení napětí na elektrody se molekuly seřadí, čímž zabrání průchodu světla, vytvářeného světelným zdrojem umístěným za destičkami.

Elektrod je spousta a každá má svou adresu. Můžou mít tvar alfanumerického nebo jiného znaku. Ztmavením příslušné elektrody vytváříme obraz.

U moderních displejů se používají maticové displeje. Ty umí tvořit prvky, odpovídající základním barvám: červená, zelená, modrá. (RGB- Red, Green, Blue)



Obr. 3.14.1 Složení LCD [3]

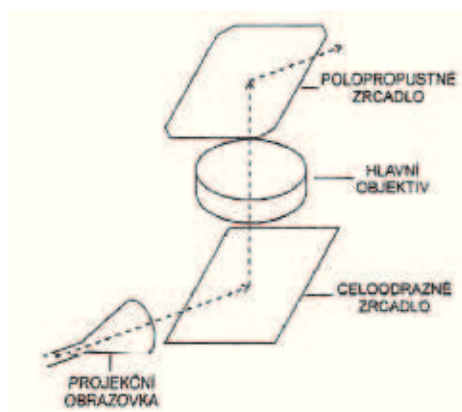
### 3.15 AMLCD (Active Matrix Liquid Crystal Display)

AMLCD vznikly vývojem LCD. Tyto displeje jsou složeny z prvků, které vytvářejí základní RGB- Red Green Blue (červená, zelená, modrá) barvy. Každý jejich obrazový prvek (pixel) je samostatně adresovaný.

### 3.16 HUD (Head Up Display)

Průhledové displeje zobrazují navigační informace a polohové úhly letadla přímo do zorného pole pilota a to tak, že se jeví jako by v dálce. Jejich velkou výhodou je, že pilot má potřebné informace v každém okamžiku letu na očích a při pohledu displejem na krajinu není potřeba akomodace očí. Tyto displeje se už poměrně dlouhou dobu využívají ve vojenských zejména bojových letounech, ale poslední dobou se pomalu začínají zastavovat i do některých civilních obchodních letadel.

Celý HUD se skládá z projekční obrazovky, která vytváří obraz. Ten je pomocí odrazu od celoodrazného zrcadla přenášen skrz hlavní objektiv na polopropustné zrcadlo, které je průhledné a vytváří dojem, že informace jsou zobrazovány jako by v dálce. Tak jak je zobrazeno na obrázku.



Obr. 3.16.1 Průhledový displej [3]

## 4 Aplikační možnosti inerciálního referenčního systému

V první části této kapitoly objasňují pojem bezpilotní letoun, dále popisují jejich historii, současnost a využití inerciálního referenčního systému v regulační soustavě bezpilotních letounů. V druhé části kapitoly se zamýšlí nad dalšími možnostmi využití inerciálního referenčního systému a nad budoucnosti letecké dopravy a možným rozvojem a aplikací inerciálního referenčního systému.

### 4.1 Bepilotní letouny- UAV, (Uninhabited Aerial Vehicles)

Bepilotní letoun je letadlo bez posádky, které může být řízené na dálku, nebo létat samostatně pomocí předprogramovaných letových plánů, nebo pomocí složitějších dynamických autonomních systémů. [10]

Historie bezpilotních letounů je velice bohatá a poměrně dlouhá. I když veřejnost je většinou vnímá, zhruba posledních dvacet let, kdy bezpilotní letouny zaznamenali bouřlivý

rozvoj. I proto se o nich mluví jako o mladém odvětví leteckého průmyslu. Proto také nemá smysl v této práci definovat všechny typy a kategorie bezpilotních letounů, ty jsou sice definovány, ale s postupným vývojem se upravují a doplňují o další a další kategorie. Uvedu jen jedno, rozdělení, které považuji pro tuto práci za zásadní. A sice rozdělení podle stupně automatizace, na aktivní, kdy letoun je autonomní- je schopný se samostatně rozhodovat a reagovat na podněty z okolí a na pasivní, kdy systém není autonomní- není schopen se samostatně rozhodovat a reagovat na podněty z okolí.

První bezpilotní letoun byl z roku 1916 od profesora Archibalda Montgomeryho Lowa a jmenoval se Aerial Target- vzdušný cíl. Tento letoun byl pasivní a řízen na dálku. Následovalo mnoho dalších pasivních letadel řízených na dálku. Ale Hewitt-Sperry Automatick Airplane, vyrobený během První světové války v USA byl už vybaven i automatikou řídící jednotkou složenou z gyrostabilizátoru, aneroidového výškoměru, servomotorů a elektrického generátoru pro jejich pohon. Spolupráce všech těchto přístrojů mu umožnila automatický let určeným směrem. A v dané výšce, po uletění přednastavené vzdálenosti přechod do střemhlavého letu. Dálkové ovládání sloužilo pro počáteční nastavení letu a umožňovalo částečnou změnu směru i během něj. Tyto systémy mají sice do plně autonomních systému, využívajících inerciální referenční systém daleko, ale už začínají obsahovat komponenty, které později v inerciální referenční systém přerostly. Všechny tyto bezpilotní letouny byly z většiny navrženy jako pohyblivé vzdušné cíle pro výcvik dělostřelectva.

Ale v druhé světové válce byly bezpilotní letouny navrhovány jako zbraně a špionážní letouny a to vedlo k ještě větší automatizaci. Asi nejznámější je německá Fi 103- FZG 76- V-1, většinou známá pouze pod označením V-1. Jedná se o bezpilotní letadlo s trupem doutníkového tvaru, malým obdélníkovým křídlem a pulzačním motorem. Vnitřní prostor trupu obsahoval bojovou hlavici, baterii, nádrž s palivem pro pulzační motor, nádrže na stlačený vzduch. Stlačený vzduch sloužil pro pohon čerpadla paliva, pneumatického ovládání směrového, výškového kormidla. A nakonec řídící jednotku, kterou tvořil magnetický kompas a autopilot Askania s gyroskopy. Z důvodu obavy nad převahou Německa začala bezpilotní letouny vyvíjet i Anglie a Amerika. Zlomovým okamžikem pro bezpilotní letouny, byl rok 1964. Tehdy se prosadili ve Vietnamské válce, kde Američané využívali služby populárního Ryan Q-2 Firebee.

Postupně začalo vznikat mnoho soukromých firem, zabývajících se vývojem a výrobou bezpilotních letounů. Z nich jsou dnes významné například Aero Vironment, General Atomic, Northrop Grumman. Ty už dnes zvládají vyrábět plně autonomní bezpilotní letouny

využívající inerciální referenční systém. Postupem času vůdčí postavení ve výrobě a provozování bezpilotních letounů převzala po Izraeli USA, která je nyní, technologicky napřed o několik let. Jak je vidět za vznikem bezpilotních letounů stojí převážně špičkové technologie, které nám přinesl vojenský průmysl.

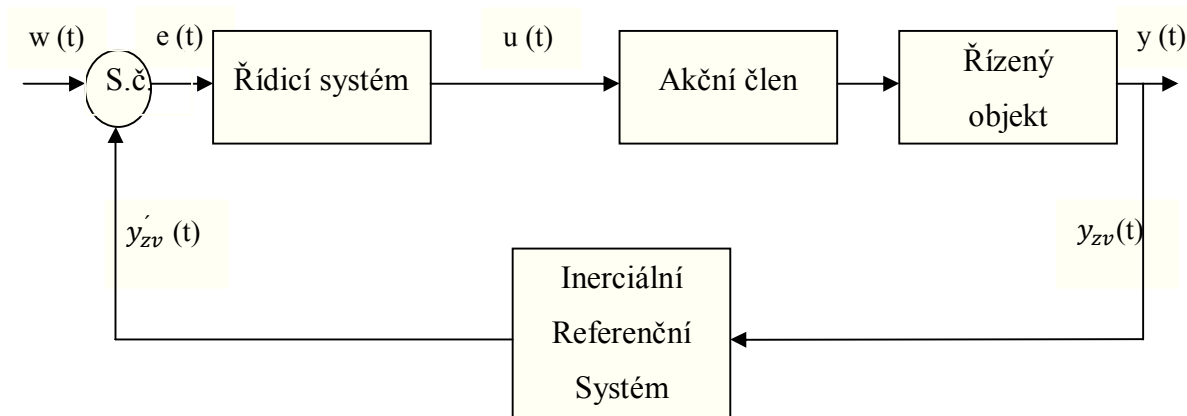
Již legendární je příhoda o čtyřiceti iráckých vojácích, kteří se na dálku máváním bílými šátky vzdali bezpilotnímu letounu Pioneer, který naváděl palbu z bitevních lodí. Tato „komická“ situace, ukázala, jak obrovský vojenský potenciál bezpilotní letouny mají.

Stejně velký potenciál mají bezpilotní letouny v civilním sektoru. Kde mají usnadňovat práci lidem a zastoupit je v rizikových situacích, ale i při mírovém monitorování situace na Zemi. Už teď vše nasvědčuje tomu, že i letecká doprava lidí se bude ubírat směrem bezpilotních letounů.

První civilní dopravní bezpilotní letadlo by mělo být do provozu uvedeno okolo roku 2020, ale v podstatě už dnešní letadla mohou být vybavena tak, že celý let bez nestandardních situací dovedou provést, aniž by pilot musel do řízení zasahovat.

V průběhu vývoje a automatizace bezpilotních letounů byl asi největší problém dokonale zvládnutí orientace a stabilizace letadla v prostoru. A u autonomních strojů zpracování informací v okolí letounu. Při řešení těchto problémů se osvědčila aplikace inerciálního referenčního systému spolu s dalšími přístroji zapojenými do soustavy. A to především díky přesnosti, malé velikosti, nízké hmotnosti a snadné integraci s dalšími systémy. Díky velkému pokroku v oblasti elektroniky, optoelektroniky, elektrických a elektromechanických snímačů se daří vyrábět inerciální referenční systémy i o velikosti jen několik desítek milimetrů. Nicméně požadavky na autonomnost bezpilotních letounů způsobily, že inerciální referenční systém se postupně transformuje a doplňuje. Dnes už může být tvořen pouze speciální „kamerou“ a počítačem, který ze snímaného obrazu dokáže posuzovat polohu vzhledem k referenci.

#### 4.2 Obecná regulační soustava bezpilotních letounu s využitím inerciálního referenčního systému jako záporné zpětné vazby



Obr. 4.2.1 Obecná regulační soustava bezpilotních letounu

Cílem regulační soustavy je udržet hodnoty stanovených parametrů v každém časovém okamžiku na předem stanovených hodnotách.

Na vstup regulační soustavy je do součtového členu- S. č. přiváděná řídicí veličina-  $w(t)$ , neboli požadovaná hodnota- například velikost úhlu příčného náklonu letadla. V součtovém členu se od této hodnoty odečítá skutečná hodnota-  $y'_{zv}(t)$ , neboli regulovaná veličina zpětné vazby- například skutečná hodnota náklonu. A právě tuto hodnotu nám v rámci zpětné vazby poskytne inerciální referenční systém. Díky tomu součtový člen vypočte regulační odchylku-  $e(t)$ , což je veličina, o kterou musí řídicí systém provést opravu- pro nás například úhel, o který musí opravit příčný náklon. Řídicí systém tedy vyhodnotí regulační odchylku a vyšle signál akčnímu členu- například servomotoru. Tomuto signálu se říká akční veličina regulátoru a akčnímu členu říká o kolik stupňů a v jakém směru upravit výchylky kormidel, které změní polohu řízeného objektu. Pak polohu řízeného objektu překontroluje znovu v rámci zpětné vazby inerciální referenční systém a hodnotu opět pošle do součtového členu. Vše se provádí tak dlouho, dokud rozdíl mezi řídicí veličinou a regulovanou veličinou zpětné vazby není nula.

Takto zjednodušeně funguje regulační soustava v bezpilotních letounech a s trochou nadsázky to lze prohlásit i o autopilotu v dopravních letadlech.

Nicméně bezpilotní letadla- bezpilotní dopravní letadla se budou v budoucnu prosazovat víc a víc a možná dostanou úplně jinou podobu než nyní a tak je i hodně pravděpodobné, že celý inerciální referenční systém se přetransformuje do úplně jiné podoby a bude možná fungovat na úplně jiném principu, který třeba doposud ještě nebyl objeven. Vizi o možné budoucnosti inerciálního referenčního systému popisují v další kapitole.

#### **4.3 Úvaha o budoucnosti letecké dopravy, možný vývoj a aplikace inerciálního referenčního systému**

Už nyní bychom měli pomalu lidi připravovat na cestování letadly bez pilotů! Vše nasvědčuje tomu, že éra bezpilotních dopravních letadel v blízké budoucnosti opravdu začne. Jak už jsem uvedl, první bezpilotní dopravní letoun, je plánován na rok 2020. Jeho uvedením do provozu výrazně stoupne i automatizace letecké dopravy. Dojde k zpřesnění navigace. A tedy i k snížení rozestupů mezi letadly, zvětšení propustnosti a rychlosti letecké dopravy a dalším změnám. Zároveň taky dojde k zvýšení požadavků na systémy řízení letadla- letu a tedy i na inerciální referenční systémy.

Některé studie uvádějí, že počet letů dosáhne vrcholu v roce 2025. Teoreticky řekněme, že tyto lety budeme schopni pokrýt. Ale co bude pak?

Jednou z možností je, že dojde k v úvodu zmiňovanému rozvrstvení obyvatelstva. Na něj zareagují i výrobci letadel a provozovatelé letecké dopravy.

Ti možná už plánují, jakým směrem se bude letecká doprava ubírat v budoucnosti. A tomu se budou snažit přizpůsobit i letadla a jejich schopnosti. Jestliže budoucnost je nejasná, je jednou z možností, že letadla budou stavěna tak aby vyhovovali více scénářům. Proto možná nebude třeba tak velkých letadel pro tolik lidí jako dnes a dopravci se budou snažit svými službami více přiblížit lidem a stát se tak konkurence schopnějšími. Lidé už nebudou muset jezdit na letiště, aby mohli někam letět, ale letadla je naberou přímo před „domem“. Vzdušný prostor se rozšíří o ten vesmírný. Lidé budou za prací nebo na dovolenou k novým planetám možná cestovat se stejným nadšením jako my nyní k Jadranu. V budoucnu by mohl letecký průmysl více spolupracovat s automobilovým průmyslem. Už v roce 1956 bylo vyrobeno první létající auto a podobných aut v dnešní době přibývá. Letadla by se v budoucnu autům- autobusům, svou podobou mohly přiblížit více než kdykoli jindy. Kapacita letadel nebude definována jen jejich rozměrem, ale chytrostí a rafinovaností s jakou budou spolupracovat. To donutí také dopravce a hlavně výrobce letadel k spolupráci a vytvoření normované základní koncepce dopravních letadel. Změny se dotknou také životnosti letadel. Ta se možná výrazně zkrátí. V současné době jsou letadla stavěna na zhruba 30 let provozu, ale v budoucnu se i životností přiblíží spíše autům. Tím se výrazně sníží nároky na v konstrukci použité materiály a sníží se cena letadel. Díky tomu budou letecké společnosti moct snadněji obnovovat své flotily letadly se stále lepšími parametry více vyhovujícími jejich potřebám. Zároveň “ošizené“ konstrukce budou lehčí a to povede k energetickým úsporám.



V budoucnu by tedy dopravní letadla mohly vypadat spíše jako menší autobusy kapkovitého tvaru. S dvěma malými křídly po stranách zakončenými vektorovatelnými silnými, ale energeticky nenáročnými a ekologickými motory. Jednou z významných změn dopravních letadel bude, že letadla budou v přední a zadní části mít něco jako aerodynamický závěs, pomocí kterého se k sobě bude moct zapojit libovolný počet letadel podobně jako vagóny dnešních vlaků. Tento způsob párování se také projeví v energetických úsporách, protože letadla poletí v takzvaném aerodynamickém pytli, nebo mohou využívat kavitačního efektu. To se projeví snížením odporu a pravděpodobně ne všechny budou muset mít zapnuté své motory.

Cestování by v budoucnu mohlo probíhat tak, že zákazník si prostřednictvím sociálních sítí, nebo internetových stránek letecké společnosti objedná ve stanovený čas přepravu z místa A do místa B. Letadlo přiletí na místo A, rozpozná jeho identitu pomocí RFID čipů (radio-frekvenčních identifikačních čipů) a pustí jej na palubu. Zavřou se dveře, a jakmile se pasažér připoutá, letadlo poletí vyzvednout dalšího pasažéra. Až bude mít letadlo na palubě všechny své pasažéry. Vydá se na let do cílové destinace B. Ten, bude probíhat tak, že jednotlivé letadla letící třeba jen část své cesty stejným směrem se budou během letu připojovat a nad svými cílovými destinacemi se budou zase odpojovat a rozvážet pasažéry do místa B.

Takovému způsobu dopravy bude odpovídat i řízení letového provozu. To bude pravděpodobně v kompetenci samotných letadel, které budou schopny komunikace mezi sebou, jejich počítač bude schopen provádět optimální plánování tras a zodpovědně se rozhodovat. Funkce řídicích letového provozu se pak nejspíše přetransformuje do úplně jiné podoby, nebo bude funkční jen na určité úrovni. Pravděpodobně by mohli pouze vytyčovat omezené a zakázané prostory a zasahovat jen v případě problému. Dojde k minimalizování bočních rozestupů a systém letových hladin se pravděpodobně také přetransformuje do jiné podoby.

Řízení letadel by probíhalo na různých úrovních odlišným způsobem a tím by se měnilo zapojení inerciálního referenčního systému.

1. Na kosmické úrovni. Zde je hlavním úkolem udržení směru a rychlosti protože pojem nahoře a dole zde mnoho neznamena. Zcela jistě by se inerciální referenční systém podílel na vytvoření umělé gravitace a navádění pro gravitační zrychlení. Nepatrně by měl význam pro vyhýbání se jiným tělesům (vesmírné smetí na oběžných dráhách a tělesům kosmického původu). Autonomie strojů by byla značná.
2. Na vysokých letových hladinách na mezinárodní a národní úrovni by byly řízeny dosavadním způsobem a inerciální referenční systém by byl součástí celého automatizovaného systému. Autonomie strojů bude značně omezená vzhledem k hustotě provozu.
3. V nižších letových hladinách a na místních úrovních (města, kraje,...) by řízení mohlo probíhat pouze pomocí pozemních stanic (po vzoru mobilních telefonů) a let by podléhal ve větší míře rozhodnutí pilota (živého, nebo stroje) a inerciální referenční systém by se staral pouze o stabilizaci stroje v letu schopné poloze a spolu s ostatními systémy zaručoval hladký průběh letu. Vyjimku by tvořila pouze bezpečnost a zabránění kolizi- kdy by měl systém prioritu až na úroveň zastavení stroje.
4. Na nejnižší letové úrovni (přistání a vzlet) by inerciální referenční systém byl vyřazen a celá tato fáze by probíhala pomocí senzorů umístěných přímo na stanovišti, které by zajišťovali naprosto přesnou polohu při dosednutí, nebo vzletu stroje. Toto by mohlo probíhat pomocí rádio-bóji, nebo jiných senzorů jako například parkovací systémy automobilů a fáze by probíhala opět zcela automaticky.

Toto rozdělení zohledňuje jak potřebu stabilizace strojů, tak zvyšující se požadavky na přesnost. Toto členění není absolutní a je možno si určitě představit i jiné členění, které určí reálný vývoj technologií.

## **5 Zhodnocení cíle**

V jednotlivých kapitolách této práce jsem vysvětlil co to je inerciální referenční systém, k čemu slouží, z čeho se skládá, co jej ovlivňuje, jak jej můžeme využít dnes a v budoucnu. V této fázi hodnotím práci pozitivně a s jejím rozsahem a hloubkou problematiky jsem v celku spokojen.

## **6 Závěr**

Práce je zaměřena na problematiku inerciálního referenčního systému. Jde sice o systém, který se v dnešních dopravních letadlech běžně používá. Nicméně i tak byl problém sehnat dostatečně obsáhlou literaturu pro její vypracování. Navíc častým jevem, v odborné literatuře bylo, zmatení inerciálního referenčního systému s inerciálním navigačním systémem. Proto tato práce vznikla z velké části z vlastní invence a rad odborníků z oblasti letectví. Zároveň jsem do práce zakomponoval i současné problémy letecké dopravy tak jak je vidím já. Dále poukazuji, jakým směrem se letecká doprava v budoucnu možná vydá a do jaké podoby se možná inerciální referenční systém přetransformuje, či bude spolupracovat s jinými systémy. Práci považuji za možný základ pro vznik závěrečné diplomové práce v dalším studijním období.

## 7 Použita literatura

### 7.1 Publikace:

- [1] Volner, R. a kol. *Flight Planning Management*. Brno: CERM Brno, 2007. ISBN 978-80-7204-496-2
- [2] Volner, R. *Letecká radiotechnika*. Praha: ČVUT Praha, 2003. ISBN 80-7204-294-7
- [3] Volner, R. *Digitální technologie – elektronické přístrojové systémy*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1640-1
- [4] Volner, R. *Radionavigace I*. Ostrava: VŠB-BU Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1917-4
- [5] Volner, R., Boreš, P. *Letecká radiotechnika – základy elektroniky pro piloty*. Brno: CERM Brno, 2007. ISBN 978-80-7204-523-5
- [6] Věk, V., Celerinová, J. *Letadlové systémy*. Praha: ČVUT Praha, 2002. ISBN 80-01-02501-2
- [7] Schmid, J. *Letadla 1939-1945 – Stíhací a bombardovací letadla Německa I*. Plzeň: Fraus Plzeň, 1998. ISBN 80-7238-021-4
- [8] Tarábek, P., Červinková, P. *Odmaturuj z fyziky*. Brno: Didaktis spol. s.r.o. Brno, 2006. ISBN 80-7358-058-6
- [9] Thurman, H. V., Trujillo, A. P. *Oceánografie*. Praha: Computer Press, 2005. ISBN 80-2510-353-6
- [10] Wiliam, J. R., Munson, K. *Jane's Book of Remotely Piloted Vehicles*. New York: Collier Books, 1977. ISBN: 002080640X

### 7.2 Periodika:

- [11] LK: *Letectví a kosmonautika*. Č. 2 (únor 2011). Praha: Aeromedia, a.s. 2011. Vychází měsíčně. ISSN 0024-1156.

### 7.3 WWW stránky:

- [12] *Propast mezi chudými a bohatými se prohlubuje* [online]. 4. Května 2011, [cit. 2011- 5- 12]. <[www.novinky.cz/ekonomika/232494-propast-mez-chudymi-a-bohatymi-ve-svete-se-prohlubuje.html](http://www.novinky.cz/ekonomika/232494-propast-mez-chudymi-a-bohatymi-ve-svete-se-prohlubuje.html)>.

### 7.4 Vlastní poznámky z výuky a materiály poskytnuté ve vyučovacích hodinách:

- [13] Poznámky z přednášek, cvičení a materiály poskytnuté ve vyučovacích hodinách.